

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปแบบ
การเชื่อมโยงอาร์เรย์ ภายใต้การบังเงาบางส่วน โดยใช้เทคนิค
การเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์

Comparative Study of PV Array Performance from Array Topologies
under Partial Shading using Magic Square Row Shifting Technique

ธนากร น้ำหอมจันทร์¹

Thanakorn Namhormchan¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย

¹School of Engineering, Eastern Asia University

Received: July 31, 2021

Revised: September 22, 2021

Accepted: September 29, 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 10 วัตต์ ขนาดอาร์เรย์ 5X5 จากรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP BL HC และ TCT รูปแบบการบังเงาบางส่วนแบบ SW SN LW LN และ NS การจัดเรียงอาร์เรย์แบบปกติ IC และการจัดเรียงตำแหน่งอาร์เรย์ใหม่ซึ่งตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม โดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์วิธีสยาม MS1-MS5 โดยการจำลองบน MATLAB/Simulink ผลการศึกษาเปรียบเทียบ รวมทั้งสิ้น 30 กรณี พบว่า (1) การเชื่อมโยงแบบ TCT ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ถึง 21 กรณี คิดเป็นร้อยละ 70 (2) มี 8 กรณีที่ให้ GMPP เท่ากันทั้ง 4 รูปแบบการเชื่อมโยง โดย 6 จาก 8 กรณีนี้เป็นกรณีที่ไม่มีเงาบังของทั้ง 6 รูปแบบการจัดเรียง คิดเป็นร้อยละ 26.66 และ (3) มีเพียงกรณีเดียวที่การเชื่อมโยงแบบ SP ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น คิดเป็นร้อยละ 3.33 ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ขึ้นอยู่กับรูปแบบการบังเงา การจัดเรียงอาร์เรย์ และรูปแบบการเชื่อมโยงของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ผลจากการศึกษานี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเชื่อมโยงของอาร์เรย์ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: สมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การบังเงาบางส่วน การจัดเรียงอาร์เรย์ การเชื่อมโยงอาร์เรย์ เมจิกสแควร์ วิธีสยาม

Abstract

This research demonstrates a comparative study of the performance of a rated 10 W, 5X5 PV array based on PV array topology; SP, BL, HC, and TCT partial shade patterns; SW, SN, LW, LN, and NS conventional PV array configuration IC and reconfiguration using the Magic Square row-shifting technique MS1-MS5 by simulation on MATLAB/Simulink. The result of 30 case studies found that; (1) TCT topology had the highest GMPP value compared to other topology in 21 cases, representing 70 %. (2) Eight cases had the same GMPP in all topologies, 6 of the 8 cases were the non-shading of all configuration patterns, representing 26.66 %, and (3) The only case where the SP topology had the highest GMPP value compared to the other, representing 3.33 per cent. The power loss of the PV array under partial shading conditions depends on the shading pattern, array configuration, and PV array topology. The results of this study can be used as information to choose the appropriate PV array topology in the future.

Keywords: PV array performance, partial shading, array configuration, array topology, magic square, Siamese method



บทนำ

ปัจจุบันการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างทวีคูณ เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ลดก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ไม่ส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลังงานจากฟอสซิลและลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ การผลิตกำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้หลากหลายรูปแบบทั้งสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าเฉพาะอย่าง การผลิตไฟฟ้าบนหลังคา และการผลิตในรูปแบบฟาร์ม โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ในหน่วยวัตต์ กิโลวัตต์ เมกะวัตต์ ไปจนถึงจิกะวัตต์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น กำลังผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์จะสัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์โดยตรง และปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังผลิตของ

เซลล์แสงอาทิตย์ลดลงก็คือ การบังเงาบางส่วน กำลังไฟฟ้าสูญเสียของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากการบังเงาบางส่วนไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่บังเงา แต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการบังเงา การจัดเรียงอาร์เรย์ และรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ของอาร์เรย์โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้ายังคงเดิม (Reconfiguration) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการบังเงาบางส่วนที่มีการศึกษาวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง เช่น Rakesh, Madhavaram, Ajith, Naik and Reddy (2015) นำเสนอการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยใช้เมจิกสแควร์ (Magic Square) เชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูลแบบ TCT ทำการศึกษาเกี่ยวกับอาร์เรย์ขนาด 4x4 การบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 200-900 วัตต์ต่อตารางเมตร เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์ปกติ โดยการทดสอบจริงและใช้ MATLAB/Simulink พบว่า สามารถเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าในทางทฤษฎีได้ร้อยละ 0-17.536 ในทางปฏิบัติได้ร้อยละ 2.831-44.23 De Souza Lima, Moreira, Laurindo Maitelli and Barros (2019) นำ

เสนอการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ซึ่งปรับปรุงจาก เมจิกสแควร์วิธีสยาม โดยการหมุนตำแหน่งของเมจิกสแควร์ ทำการศึกษาที่อาร์เรย์ขนาด 5X5 การบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 0 และ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยใช้ MATLAB/Simulink พบว่า สามารถลดกำลัง ไฟฟ้าสูญเสียจากการบังเงาบางส่วนได้ทุกรูปแบบเงาที่ ศึกษา Yadav, Kumar and D (2020) นำเสนอการจัด เรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยใช้เทคนิค Odd Even Configuration--OEC ซึ่งจัดเรียงตำแหน่งใหม่ของโมดูล ภายในแต่ละคอลัมน์ เชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูลแบบ TCT ทำการศึกษากับอาร์เรย์ขนาด 6X4 เปรียบเทียบกับการ เชื่อมโยงโมดูลแบบ SP-TCT BL-TCT BL-HC และ ASY การบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ โดยใช้ MATLAB/Simulink พบว่า OEC มี GMPP--global maximum power point สูงที่สุด และมีกำลังสูญเสียต่ำที่สุดในทุกกรณีการบังเงา และการเชื่อมโยงโมดูลที่ศึกษา Bonthagorla and Mikkili (2020) ได้เสนอผลการวิเคราะห์สมรรถนะของการเชื่อมโยง อาร์เรย์โมดูลแบบ Series Parallel--SP Bridge Link--BL Honey Comb--HC และ Triple Tied--TT เพื่อการเพิ่ม กำลังผลิตภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ทำการศึกษากับอาร์เรย์ขนาด 7X7 การบังเงาบางส่วน 8 รูปแบบ โดยใช้ MATLAB/Simulink พบว่า การเชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูล แบบ SP ให้กำลังผลิตสูงสุดที่ 2 รูปแบบการบังเงา แบบ BL ให้กำลังผลิตสูงสุดที่ 2 รูปแบบการบังเงา แบบ TT ให้ กำลังผลิตสูงสุดที่ 3 รูปแบบการบังเงา และให้กำลังผลิต เท่ากันทั้ง 4 รูปแบบการเชื่อมโยง 1 รูปแบบการบังเงา บางส่วน Namhormchan (2021) ได้เสนอเทคนิคการจัด เรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ซึ่งปรับปรุงจากเทคนิคเมจิกสแควร์ วิธีสยามโดยการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ ซึ่งเลื่อนครั้งละ 1 แถว เชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูลแบบ TCT เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์ปกติ ทำการศึกษากับอาร์เรย์ขนาด 5X5 การบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ โดยโมดูลที่ไม่มีเงาบังได้ รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ประมาณ 950 วัตต์ต่อตารางเมตร และโมดูลที่มีเงาบังได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ประมาณ 300 วัตต์ต่อตารางเมตร ทำการทดสอบในสถานที่จริง พบว่า เทคนิคที่เสนอช่วยเพิ่มกำลังผลิตได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงอาร์เรย์ปกติในทุกรูปแบบการบังเงาบางส่วน โดยสามารถเพิ่มกำลังผลิตได้ประมาณร้อยละ 50 ในกรณี Short Wide และร้อยละ 0.9-2.8 ในอีก 3 รูปแบบการบังเงา

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของการเชื่อมโยง อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 รูปแบบ Series Parallel--SP Bridge Link--BL Honey Comb--HC และ Total Cross Tied--TCT ต่อการเพิ่มกำลังผลิตภายใต้ เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน จำนวน 4 รูปแบบ Short Wide--SW Short Narrow--SN Long Wide--LW และ Long Narrow--LN ทำการศึกษากับอาร์เรย์ขนาด 5X5 ร่วมกับเทคนิคการจัด เรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ซึ่งปรับปรุงจากเทคนิคเมจิกส แควร์วิธีสยาม โดยการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ ซึ่งเลื่อน ครั้งละ 1 แถว (MS1-MS5) เปรียบเทียบกับการจัดเรียง แผงแบบปกติ (IC) โดยจำลองบน MATLAB/Simulink

เซลล์แสงอาทิตย์

อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) ได้มา จากการเชื่อมโยงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module/PV Panel) ในรูปแบบต่าง ๆ โดยแต่ละโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cell) หลาย ๆ เซลล์ ต่อรวมกัน (Namhormchan, 2021) แบบจำลองเซลล์ แสงอาทิตย์เขียนแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแสอิสระต่อ ขนานกับไดโอด วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดง ดังภาพ 1

คุณลักษณะแรงดันและกระแสเอาต์พุตของโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance; G) เขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$I_{PV} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{A}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

โดยที่ I_{PV} คือ กระแสของโมดูล I_{ph} คือ กระแส โฟโตอิเล็กทริก I_o คือ กระแสอิ่มตัว V_{ph} คือ แรงดันเอาต์พุต ของ PV และ $A = nkT/q$ โดยที่ n คือ แฟกเตอร์ไดโอด ในอุดมคติ (Diode Ideality Factor) k คือ ค่าคงที่ของ โบลทซ์มันน์ (Boltzmann) T คือ อุณหภูมิของโมดูล หน่วย

เป็น เคลวิน q คือ ประจุไฟฟ้า (1.602×10^{-19} C) R_s และ R_{sh} คือ ค่าความต้านทานอนุกรมและขนาน ตามลำดับ

กระแสที่เกิดจากแสงอาทิตย์หาได้จากฟังก์ชัน กระแสลัดวงจร ดังสมการที่ (2)

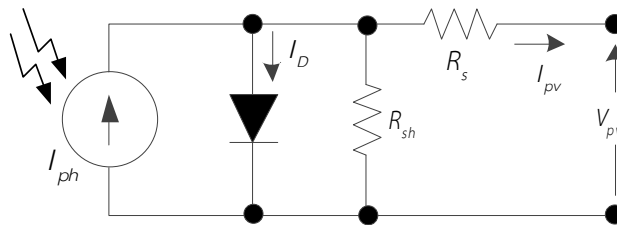
$$I_{ph} = I_{SCO} \left(\frac{G}{G_o} \right) (1 + \alpha_1 (T - T_o)) \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} \quad (2)$$

โดยที่ I_{SCO} คือ กระแสลัดวงจรของโมดูลที่ความเข้มแสงอาทิตย์มาตรฐาน G_o ($1,000$ W/m²) และอุณหภูมิมาตรฐาน T_o (25 °C) และ α_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ของกระแสลัดวงจรของโมดูล (Rani, Ilango & Nagamani, 2013)

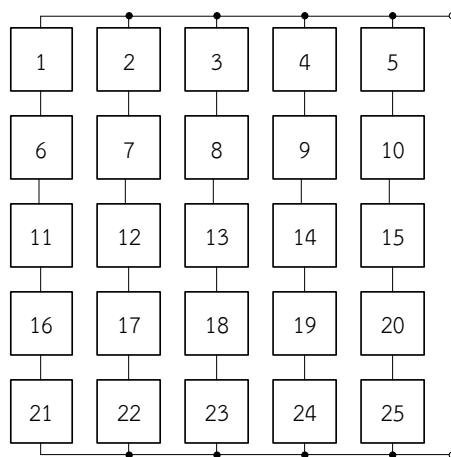
เมจิกสแควร์

เมจิกสแควร์ (Magic Square) หรือ จัตุรัสกล คือ ตารางขนาด $n \times n$ ที่แต่ละช่องของตารางมีตัวเลขใส่อยู่ โดยที่ผลรวมตัวเลขในช่องทั้งแนวนอน แนวตั้ง และแนวทแยงมีค่าเท่ากัน

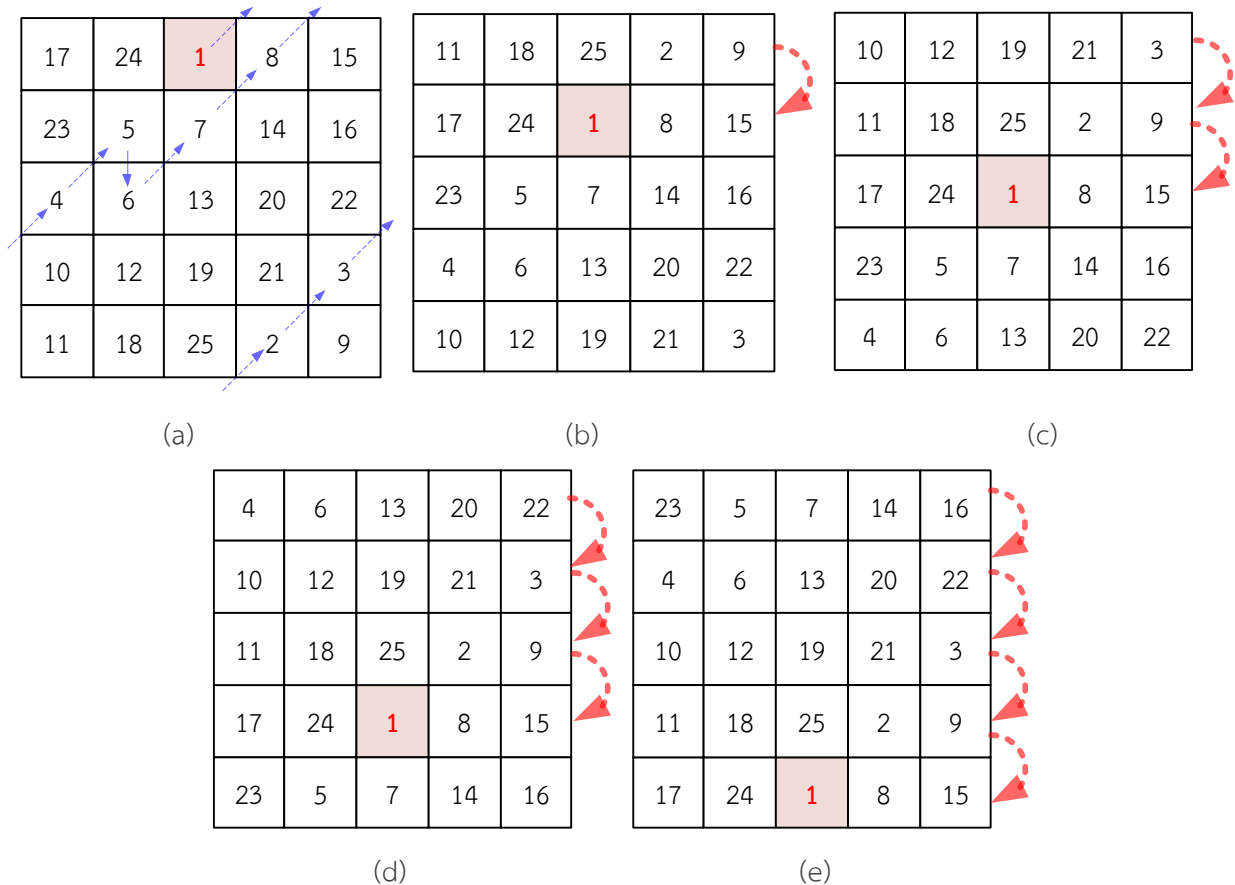


ภาพ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

Note. Adapted From “Comparative study of enhanced power generation photovoltaic array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique”, by T. Namhormchan, 2021, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), pp. 247-261. Copyright 2021 by Eastern Asia University.



ภาพ 2 การจัดเรียงอาร์เรย์แบบปกติ (Initial Configuration--IC) กรณีเชื่อมต่ออาร์เรย์โมดูลแบบ Series Parallel--SP



ภาพ 3 การจัดเรียงอาร์เรย์แบบเมจิกสแควร์ และการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ (a) MS1; (b) MS2; (c) MS3; (d) MS4; (e) MS5

Note. Adapted From “Comparative study of enhanced power generation photovoltaic array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique”, by T. Namhormchan, 2021, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), pp. 247-261. Copyright 2021 by Eastern Asia University.

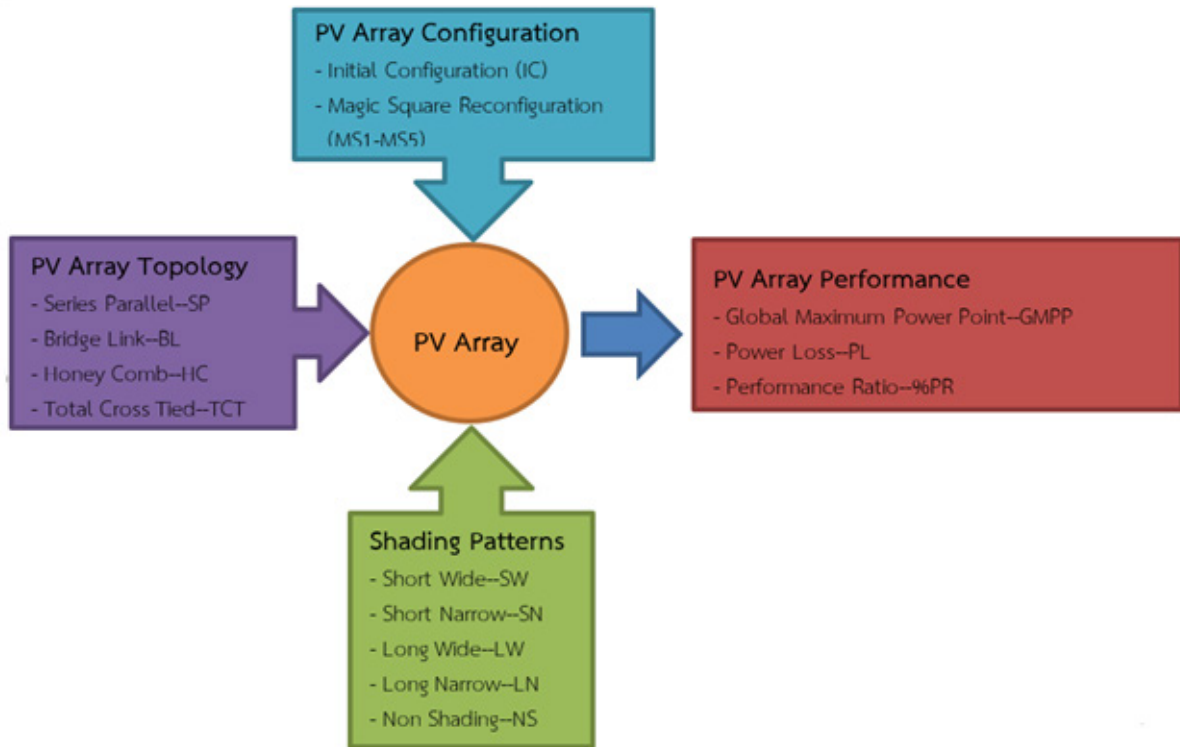
การสร้างเมจิกสแควร์ด้วยวิธีสยาม หรือวิธีเดอ ลา ลูแบร์ (Siamese method, De la Loubère method) เป็นวิธีการสร้างเมจิกสแควร์ที่มีความกว้างและยาวเป็นจำนวนคี่ใด ๆ โดย ซีมง เดอ ลา ลูแบร์ (Simon de la Loubère) นักคณิตศาสตร์และทูตชาวฝรั่งเศส ค้นพบขณะเดินทางมาเป็นคณะทูตที่ราชอาณาจักรสยามเมื่อปี ค.ศ. 1687 วิธีสยามทำให้การสร้างเมจิกสแควร์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้นเพราะมีรูปแบบที่แน่นอน โดยเมจิกสแควร์ขนาด 5X5 ด้วยวิธีสยาม มีเมจิกนัมเบอร์เท่ากับ 65 (De Souza Lima, Moreira, Laurindo Maitelli & Barros, 2019; Charoenpanitseri, 2013; Namhormchan, 2021)

การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์

อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 5X5 ประกอบขึ้นจากการจัดเรียงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 แถว 5 คอลัมน์ โดยแต่ละโมดูลจะแสดงตัวเลข เรียงลำดับตั้งแต่ 1 ถึง 25 ตัวอย่างการจัดเรียงอาร์เรย์แบบปกติซึ่งเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP แสดงดังภาพ 2

การจัดเรียงโมดูลใหม่โดยใช้เทคนิคเมจิกสแควร์ โดยใช้วิธีสยาม ขนาด 5X5 แสดงดังภาพ 3 (a) และการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ ครั้งละ 1 แถว (Namhormchan, 2021) แสดงดังภาพ 3(b) ถึง 3(e) ตามลำดับ

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพ 4 กรอบแนวคิดการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (GMPP) กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (PL) และอัตราส่วนสมรรถนะของอาร์เรย์ (PR) โดยกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม ซึ่งเป็นผลจากตัวแปรต้นต่าง ๆ ดังนี้ รูปแบบการเชื่อมโยง PV Array 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SP (2) BL (3) HC และ (4) TCT ที่มีเงาบังบางส่วน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SW (2) SN (3) LW และ (4) LN และตำแหน่งทางกายภาพของโมดูลตามการจัดเรียงโมดูลใหม่แบบ MS1-MS5 โดยมีกรอบแนวคิดการวิจัยแสดงดังภาพ 4

สมมติฐานการวิจัย

รูปแบบการเชื่อมโยง การจัดเรียงตำแหน่งของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และรูปแบบการบังเงาบางส่วนมีผลต่อสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีดำเนินการวิจัย

จำลองหาสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 5X5 ได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (GMPP) แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp}) กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (PL) และอัตราส่วนสมรรถนะของอาร์เรย์ (PR) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุดมคติของอาร์เรย์โมดูลบนโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้พารามิเตอร์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ พิกัด 10 วัตต์ (Namhormchan, 2021) แสดงดังตาราง 1

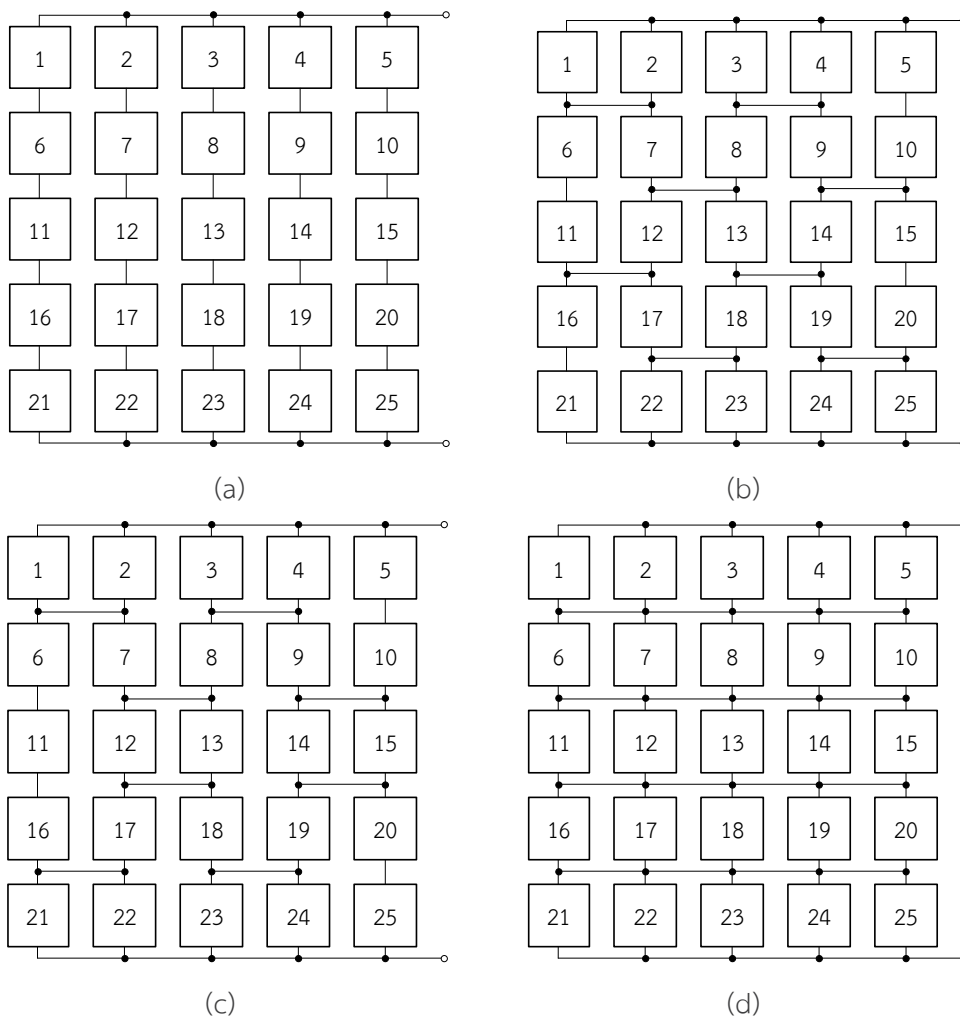
ตาราง 1

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษา

Polycrystalline Solar Panel VP-SP-10Wp
STC (1000W/m², 25°C)

Out Peak Power (P_m)	10 W		
Maximum Power Voltage (V_{mp})	18 V	Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.4 V
Maximum Power Current (I_{mp})	0.56 A	Short Circuit Current (I_{sc})	0.67 A

Note. Adapted From “Comparative study of enhanced power generation photovoltaic array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique”, by T. Namhormchan, 2021, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), pp. 247-261. Copyright 2021 by Eastern Asia University.



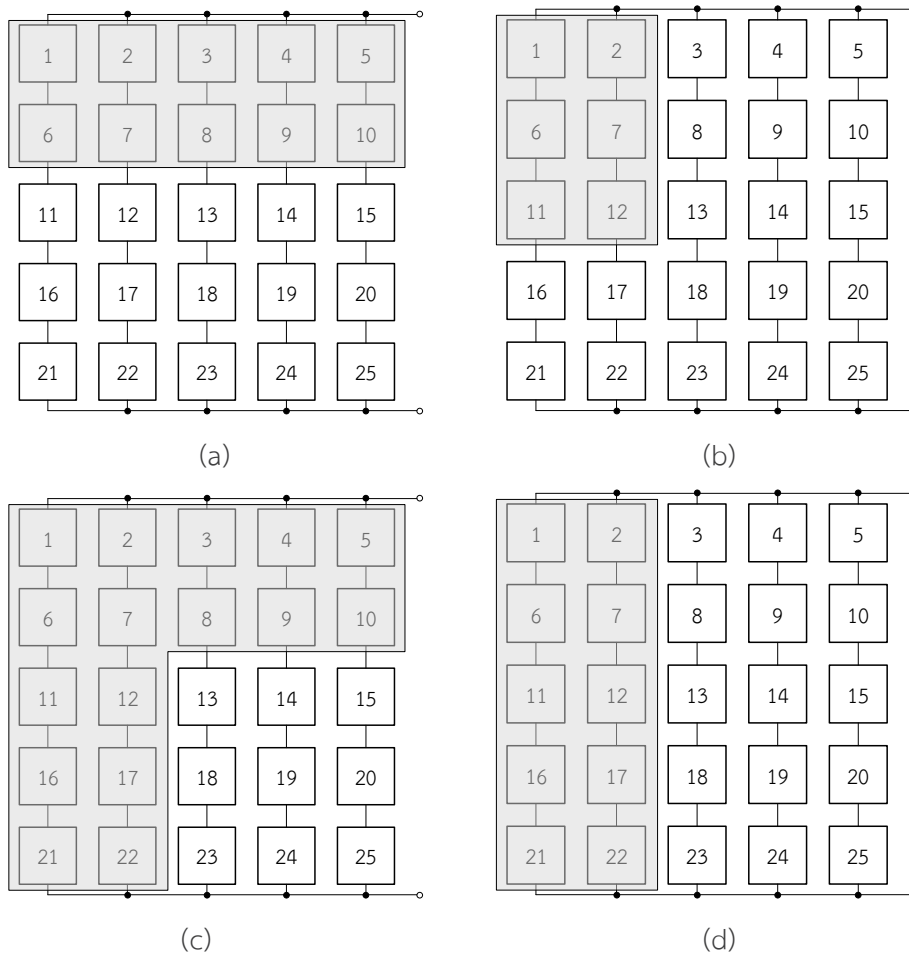
ภาพ 5 การจัดเรียงโมดูลแบบ IC รูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ (a) Series-Parallel--SP; (b) Bridge-Link--BL; (c) Honey-Comb--HC; (d) Total-Cross-Tied--TCT

รูปแบบการเชื่อมโยง PV Array 5X5 แบบดั้งเดิม 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) Series-Parallel--SP; (2) Bridge-Link--BL; (3) Honey-Comb--HC; (4) Total-Cross-Tied--TCT (Raju & Chengaiah, 2019) แสดงดังภาพ 5

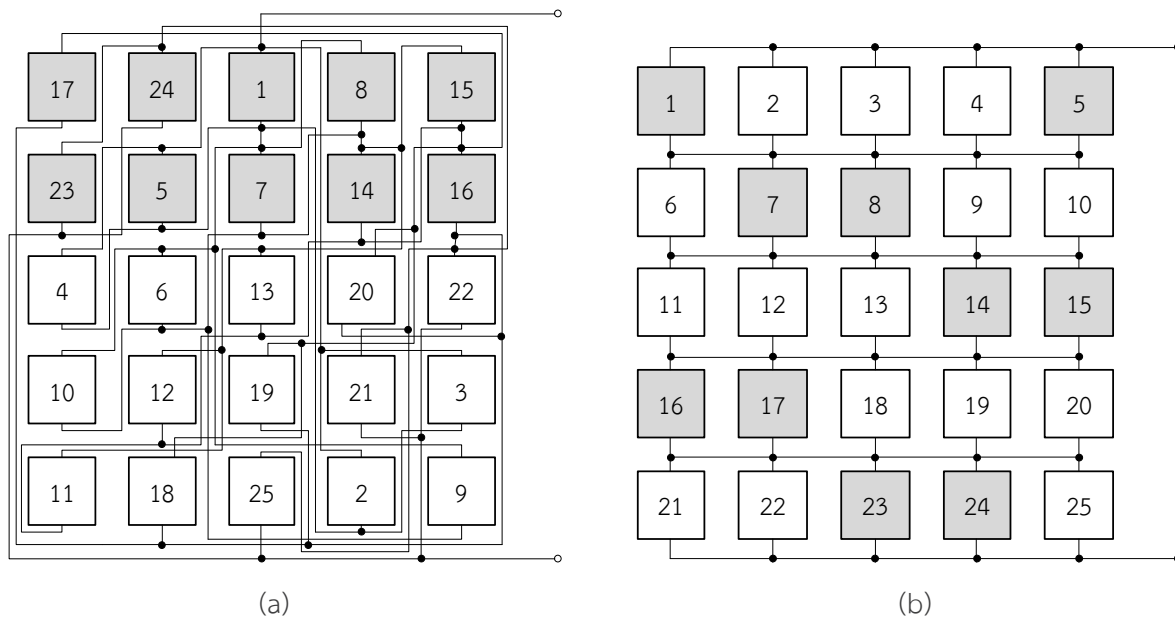
โมดูลที่ไม่มีเงาบังได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และโมดูลที่มีเงาบังจะได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 300 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษากำหนดการบังเงาบางส่วนจากจำนวนของคอลัมน์ (ความกว้าง) และจำนวนโมดูลต่อคอลัมน์ (ความยาว) ที่มีเงาบัง 4 รูปแบบ ได้แก่

(1) Short Wide--SW (2) Short Narrow--SN (3) Long Wide--LW และ (4) Long Narrow--LN ตัวอย่างการบังเงาบางส่วนสำหรับการจัดเรียงโมดูลแบบ IC เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP ซึ่งมีจำนวนและตำแหน่งของโมดูลที่ได้รับการบังเงาในแต่ละรูปแบบดังภาพ 6

ตำแหน่งทางกายภาพของโมดูลตามการจัดเรียงโมดูลใหม่แบบ MS1 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วนตามแบบ SW แสดงดังภาพ 7 (a) และการกระจายเงาบังบางส่วนตามการจัดเรียงโมดูลแบบ IC เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT แสดงดังภาพ 7 (b)

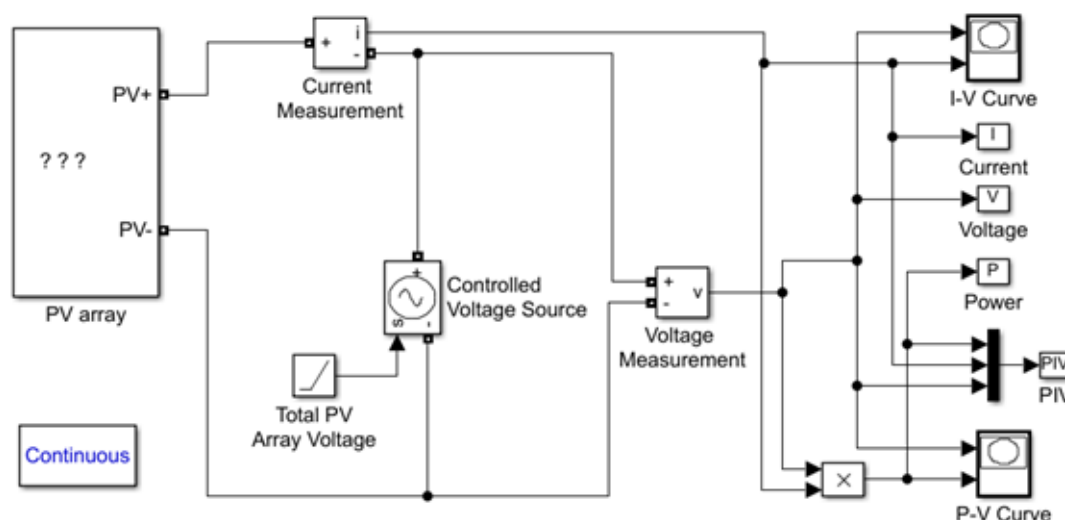


ภาพ 6 การจัดเรียงโมดูลแบบ IC การเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP และการบังเงาบางส่วน (a) Short Wide--SW; (b) Short Narrow--SN; (c) Long Wide--LW; (d) Long Narrow--LN

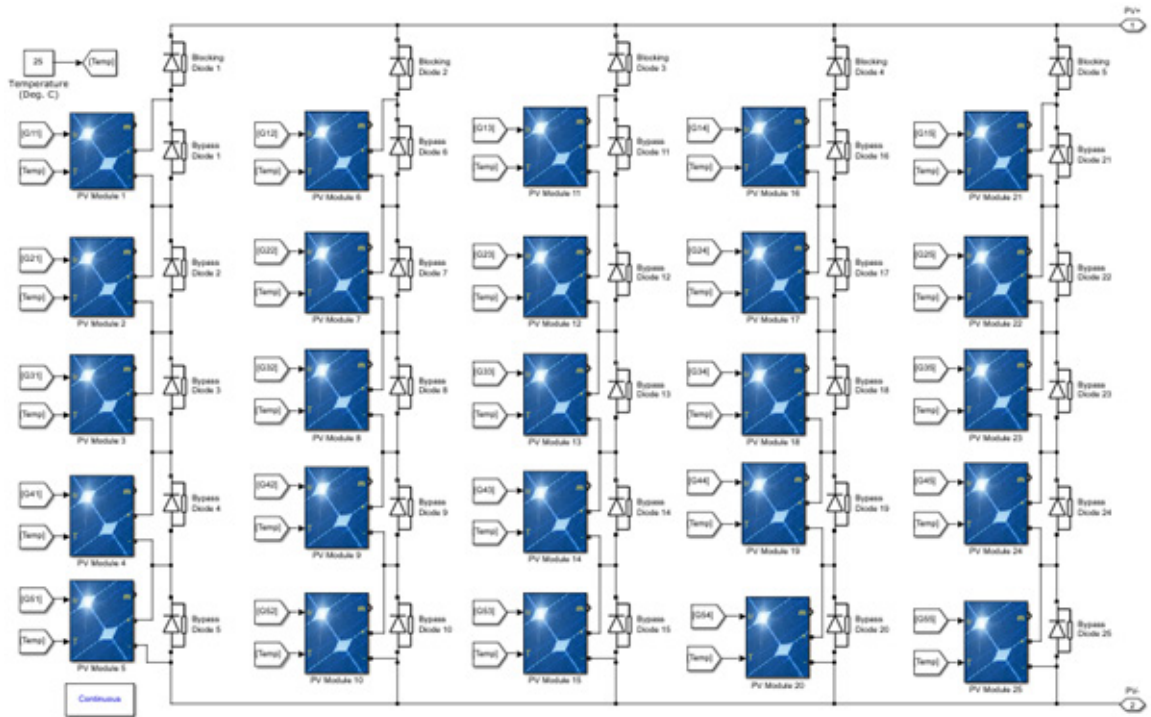


ภาพ 7 การเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วนแบบ SW (a) การจัดเรียงโมดูลแบบเมจิกสแควร์ MS1; (b) การกระจายเงาบังบางส่วน

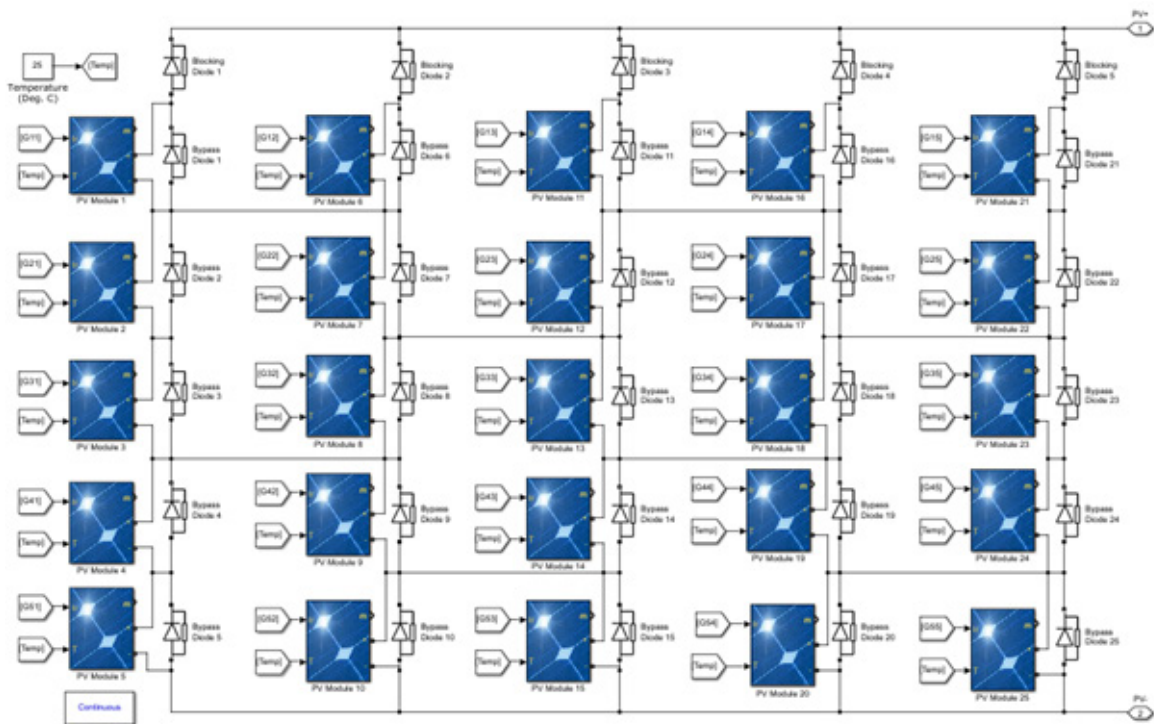
Note. Adapted From “Comparative Study of Enhanced Power Generation Photovoltaic Array under Partial Shading Conditions using Magic Square Row Shifting Technique”, by T. Namhormchan, 2021, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), pp. 247-261. Copyright 2021 by Eastern Asia University.



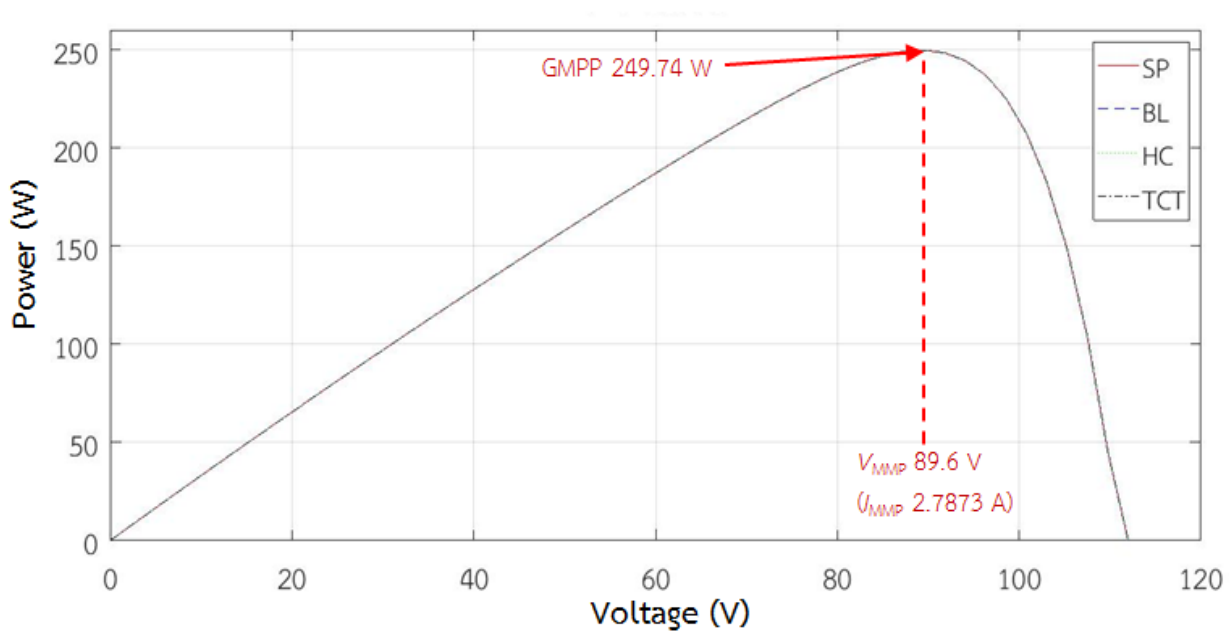
ภาพ 8 บล็อกไดอะแกรมสำหรับหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink



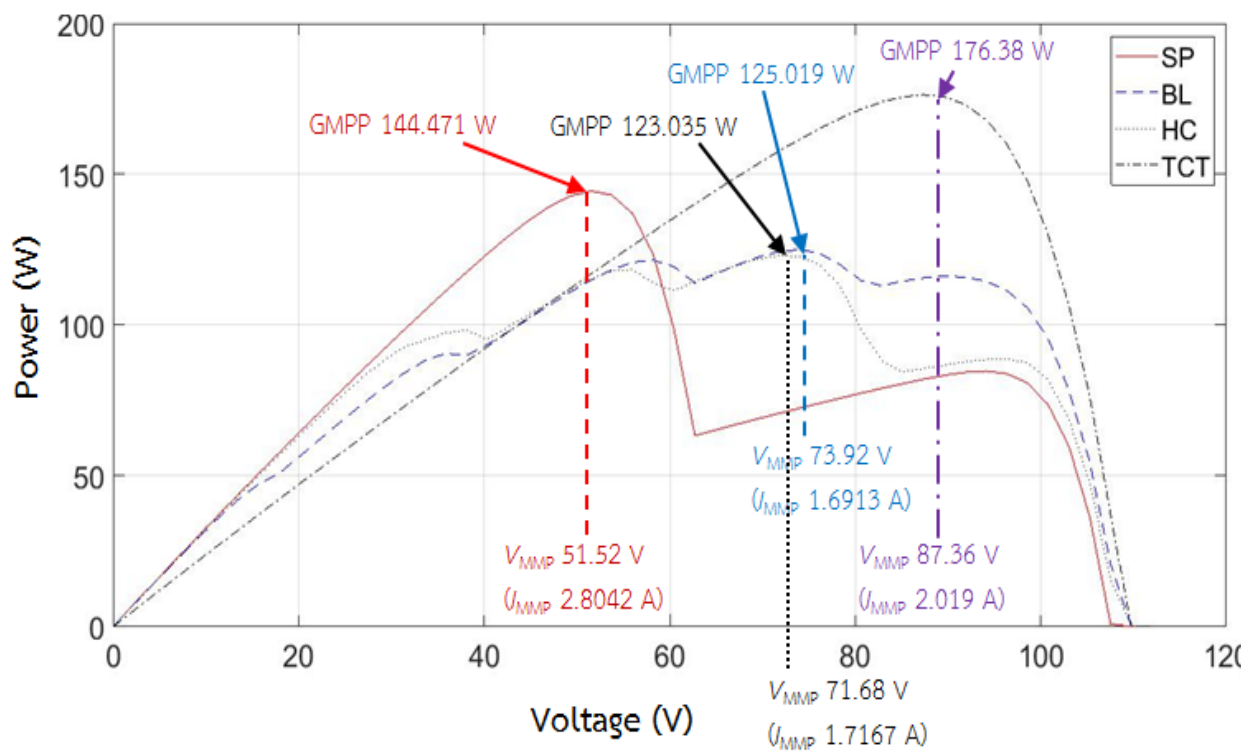
ภาพ 9 ตัวอย่างการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส บนโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพ 10 ตัวอย่างการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ BL อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส บนโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพ 11 ตัวอย่าง P-V Curve ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ IC ไม่มีการบังเงา การเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบต่าง ๆ



ภาพ 12 ตัวอย่าง P-V Curve ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS1 การบังเงาแบบ SW การเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบต่าง ๆ

บล็อกไดอะแกรมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (GMPP) แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp}) ของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink (Tubniyom, Jaideaw, Chatthaworn, Suksri, and Wongwuttanasatian, 2018; Raju and Chengaiah, 2019; Bonthagorla and Mikkili, 2020; Abdelrahman, Abou-Hashima, El-Sayed, Yehia and Husam, 2021) แสดงดังภาพ 8 การจัดเรียงโมดูลรูปแบบ

ต่าง ๆ การเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบต่าง ๆ และการกำหนดความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละโมดูลตามรูปแบบการบังเงาบางส่วนรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งการกำหนดอุณหภูมิโมดูลบนโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการจำลองหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพ 9 กรณีตัวอย่างการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส และแสดงดังภาพ 10 กรณีตัวอย่างการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ BL อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส

ตาราง 2

ผลการจำลองหาสมรรถนะของอาร์เรย์ไมโครเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปแบบการเชื่อมต่ออาร์เรย์ การบังเงาบางส่วน และการจัดเรียงอาร์เรย์

Topology		SP			BL			HC			TCT			Best Topology	Worst Topology
Conf.	Shad.	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)		
IC	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
	SW	144.47	105.53	57.79	144.47	105.53	57.79	144.47	105.529	57.79	144.47	105.53	57.79	-	-
	SN	181.42 ^w	68.58	72.57	182.64	67.36	73.05	185.18	64.824	74.07	188.71 ^b	61.29	75.48	TCT	SP
	LW	106.19 ^b	143.81	42.48	102.71	147.29	41.08	103.32	146.675	41.33	101.81 ^w	148.19	40.72	SP	TCT
MS1	LN	176.38	73.62	70.55	176.38	73.62	70.55	176.38	73.620	70.55	176.38	73.62	70.55	-	-
	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
	SW	144.47	105.53	57.79	125.02	124.98	50.01	123.03 ^w	126.965	49.21	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC
	SN	171.57	78.43	68.63	165.32	84.68	66.13	154.89 ^w	95.106	61.96	192.16 ^b	57.84	76.87	TCT	HC
MS2	LW	80.04 ^w	169.96	32.02	95.89	154.11	38.36	92.39	157.609	36.96	116.73 ^b	133.27	46.69	TCT	SP
	LN	144.47	105.53	57.79	129.52	120.48	51.81	128.93 ^w	121.065	51.57	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC
	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
	SW	144.47	105.53	57.79	121.45	128.55	48.58	120.24 ^w	129.761	48.10	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC
MS3	SN	171.57	78.43	68.63	161.13 ^w	88.87	64.45	162.58	87.418	65.03	192.16 ^b	57.84	76.87	TCT	BL
	LW	80.04 ^w	169.96	32.02	91.85	158.15	36.74	88.41	161.587	35.37	116.73 ^b	133.27	46.69	TCT	SP
	LN	144.47	105.53	57.79	129.52	120.48	51.81	128.93 ^w	121.065	51.57	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC
	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
MS3	SW	144.47	105.53	57.79	125.02	124.98	50.01	118.72 ^w	131.283	47.49	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC
	SN	171.57	78.43	68.63	158.07 ^w	91.93	63.23	175.92	74.081	70.37	192.16 ^b	57.84	76.87	TCT	BL
	LW	80.04 ^w	169.96	32.02	90.94	159.06	36.38	90.42	159.583	36.17	116.73 ^b	133.27	46.69	TCT	SP
	LN	144.47	105.53	57.79	129.52	120.48	51.81	128.93 ^w	121.065	51.57	176.38 ^b	73.62	70.55	TCT	HC

ตาราง 2 (ต่อ)

Topology	SP			BL			HC			TCT			Best Topology	Worst Topology	
	Shad.	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)	PR (%)	GMPP (W)	PL (W)			PR (%)
MS4	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
	SW	144.47	105.53	57.79	113.36 ^w	136.64	45.35	115.92	134.078	46.37	176.38 ^B	73.62	70.55	TCT	BL
	SN	171.57	78.43	68.63	151.36 ^w	98.64	60.55	158.43	91.567	63.37	192.16 ^B	57.84	76.87	TCT	BL
	LW	80.04 ^w	169.96	32.02	90.16	159.84	36.06	91.81	158.190	36.72	116.73 ^B	133.27	46.69	TCT	SP
	LN	144.47	105.53	57.79	129.52	120.48	51.81	128.93 ^w	121.065	51.57	176.38 ^B	73.62	70.55	TCT	HC
MS5	NS	249.74	0.26	99.90	249.74	0.26	99.90	249.74	0.260	99.90	249.74	0.26	99.90	-	-
	SW	144.47	105.53	57.79	113.36 ^w	136.64	45.35	125.07	124.932	50.03	176.38 ^B	73.62	70.55	TCT	BL
	SN	171.57	78.43	68.63	162.08	87.92	64.83	161.08 ^w	88.917	64.43	192.16 ^B	57.84	76.87	TCT	HC
	LW	80.04 ^w	169.96	32.02	91.46	158.54	36.58	90.95	159.049	36.38	116.73 ^B	133.27	46.69	TCT	SP
	LN	144.47	105.53	57.79	129.52	120.48	51.81	128.93 ^w	121.065	51.57	176.38 ^B	73.62	70.55	TCT	HC

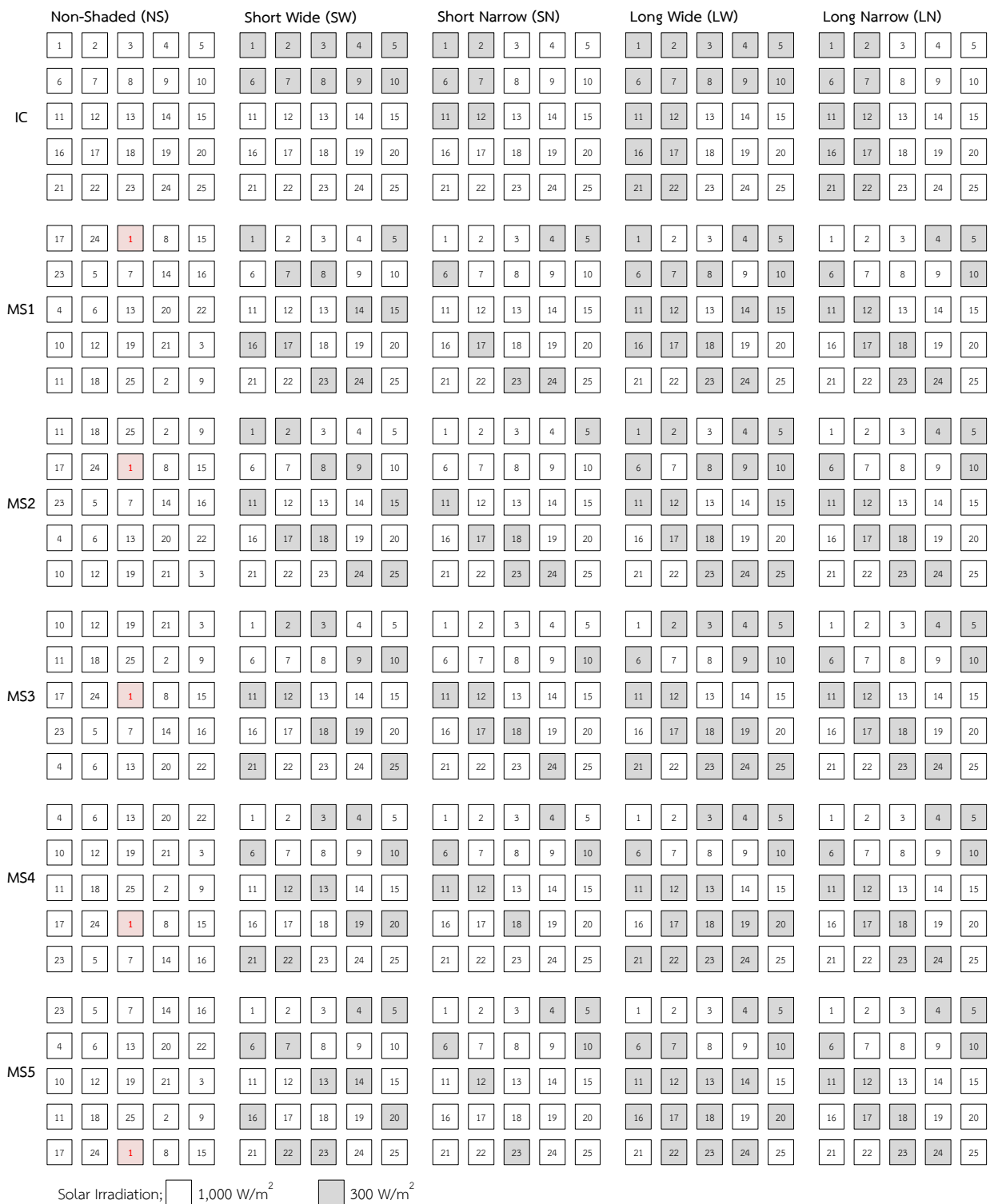
Note : Global Maximum Power Point--GMPP from MATLAB/Simulink Simulation

Ideal Maximum Power of PV Array=10 W X (5X5)=250 W (Power Loss--PL=Ideal Maximum Power of PV Array-Global Maximum Power Point

Performance Ratio--PR=(Global Maximum Power Point / Ideal Maximum Power of PV Array) X100 %

^B : Best Topology

^w : Worst Topology



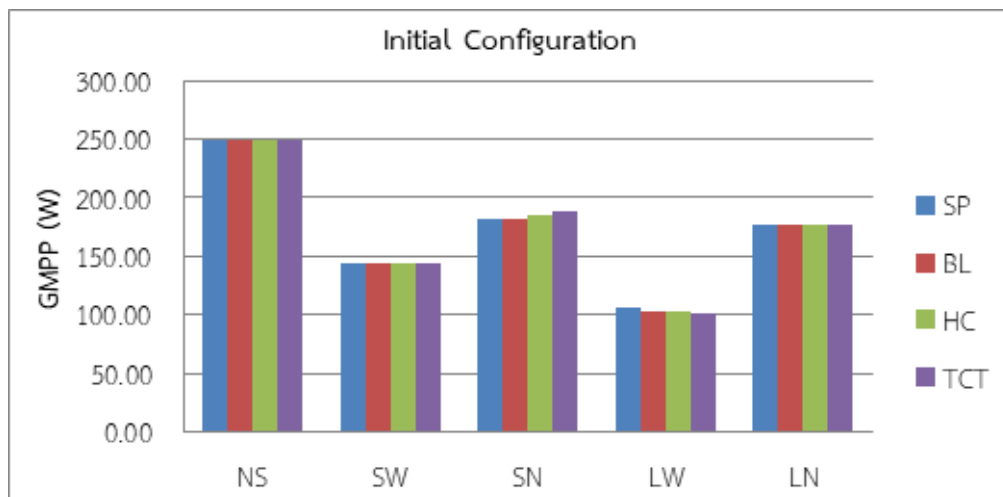
ภาพ 13 การกระจายการบังเงาบางส่วนของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 5X5 ที่รูปแบบการบังเงาต่าง ๆ

Note. Adapted From “Comparative study of enhanced power generation Photovoltaic Array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique”, by T. Namhormchan, 2021, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), pp. 247-261. Copyright 2021 by Eastern Asia University.

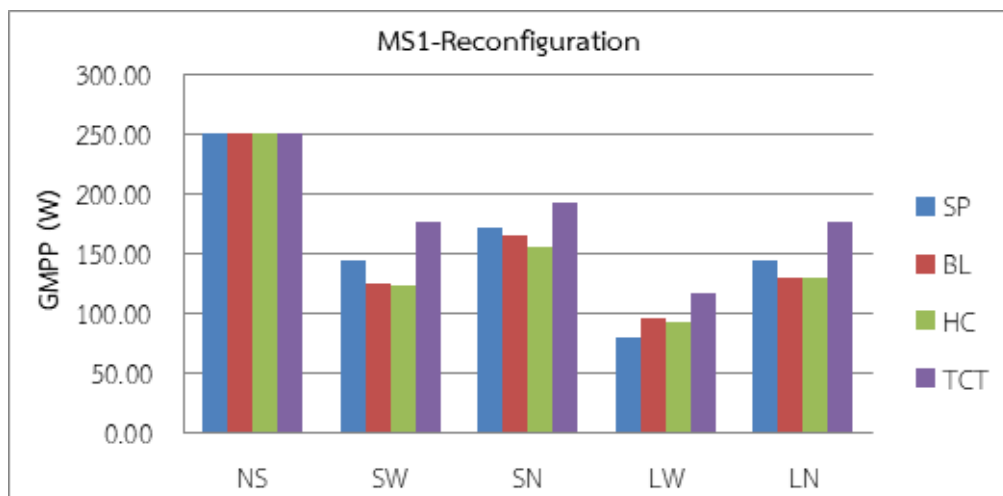
ตัวอย่างผลการจำลองอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กรณีไม่มีการบังเงา การเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพ 11 พบว่า GMPP เท่ากับ 249.74 วัตต์ ในทุกรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุดมคติของอาร์เรย์โมดูลที่ 250 วัตต์ และภาพ 12 แสดง P-V Curve ของอาร์เรย์โมดูลที่จัดเรียงแบบ MS1 การบังเงาบางส่วนแบบ SW พบว่า ที่การบังเงาบางส่วนรูปแบบเดียวกันรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์แตกต่างกันกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดแตกต่างกัน ดังนี้ 176.38 144.471 125.019 และ 123.035 วัตต์ตามลำดับ สำหรับการเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบ TCT SP BL และ HC ตามลำดับ

ผลการวิจัย

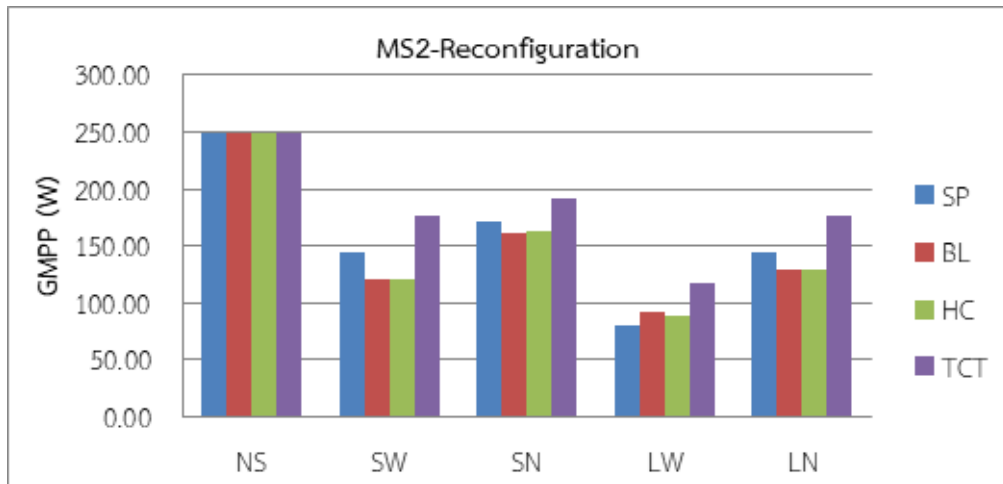
ผลการจำลองหาสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ SP BL HC และ TCT การบังเงาบางส่วนรูปแบบ SW SN LW LC และไม่มีการบังเงา (NS) และการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ IC MS1-MS5 แสดงดังตาราง 2 ซึ่งการกระจายการบังเงาบางส่วนของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 5X5 ที่รูปแบบการบังเงาต่าง ๆ แสดงดังภาพ 13 และการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดจากการเชื่อมโยงอาร์เรย์แต่ละรูปแบบ การบังเงาบางส่วนแต่ละรูปแบบ สำหรับการจัดเรียงอาร์เรย์ IC MS1-MS5 แสดงดังภาพ 14 ถึง 19



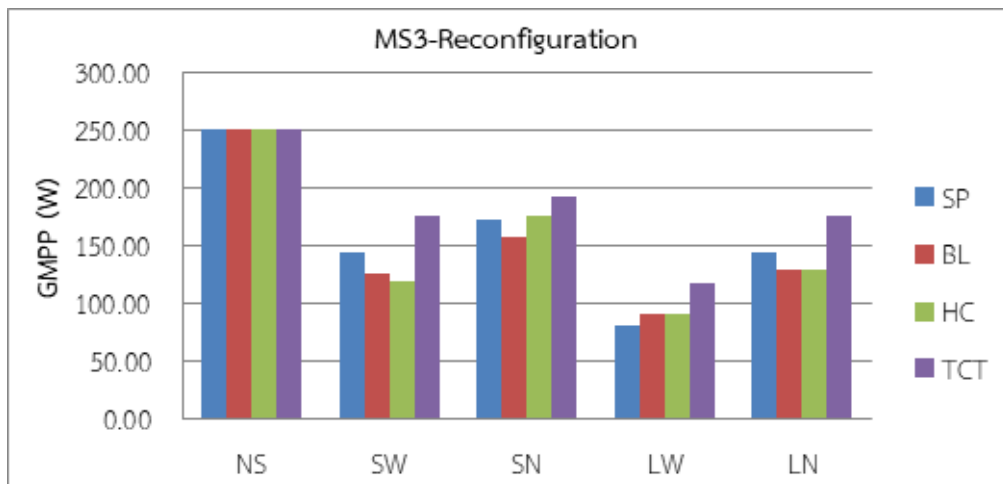
ภาพ 14 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ IC



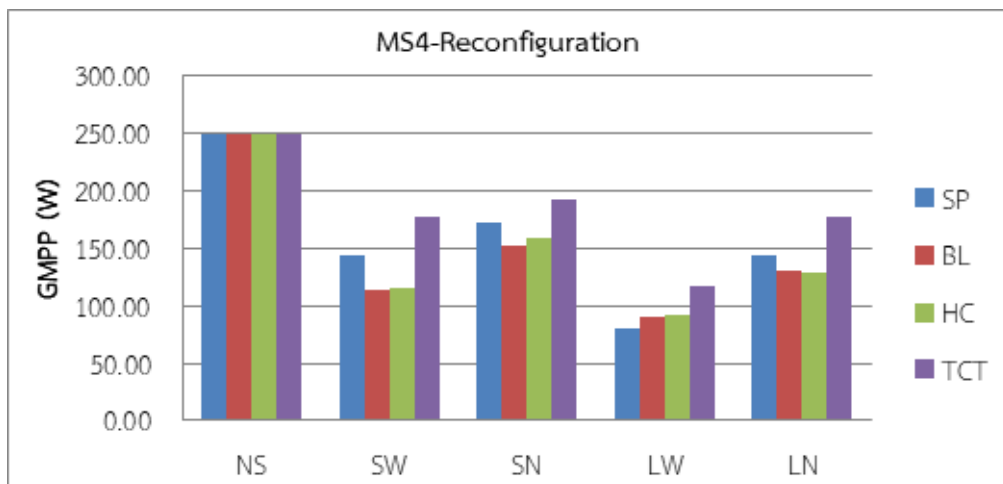
ภาพ 15 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS1



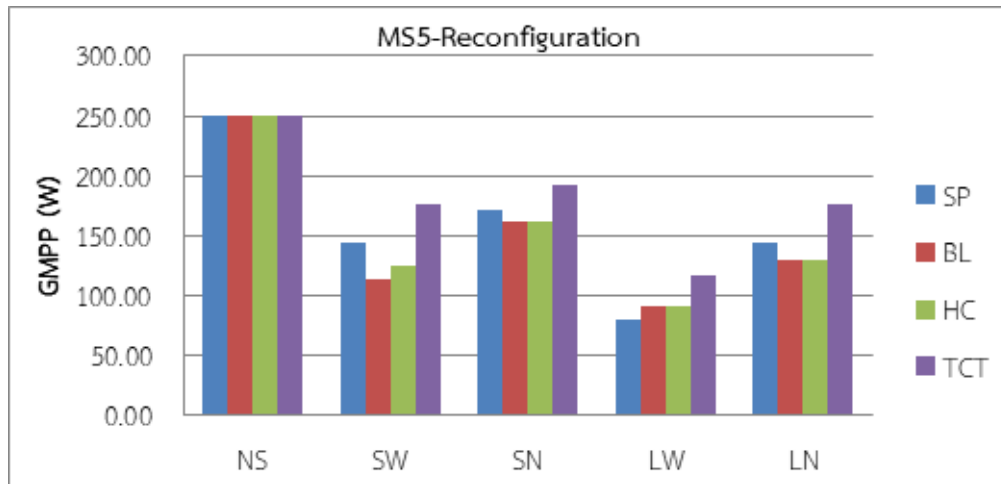
ภาพ 16 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS2



ภาพ 17 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS3



ภาพ 18 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS4



ภาพ 19 การเปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงแบบ MS5

การอภิปรายผล

การเชื่อมโยงอาร์เรย์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ SP BL HC และ TCT การจัดเรียงอาร์เรย์โมดูลที่แตกต่างกัน ได้แก่ IC MS1 – MS5 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงารูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ NS SW SN LW และ SN ที่อุณหภูมิของโมดูลคงที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลโดยการจำลองบน MATLAB/Simulink พบว่า ส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (GMPP) แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp}) กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (PL) และอัตราส่วนสมรรถนะของอาร์เรย์ (%PR) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะประเมินจาก GMPP และ %PR ที่สูงที่สุดหรือ PL ที่ต่ำที่สุดในแต่ละการเชื่อมโยงอาร์เรย์และรูปแบบการบังเงาดังแสดงในตาราง 2 ตัวอย่าง เช่น (1) การจัดเรียงแบบ IC การบังเงาแบบ SN รูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ที่ดีที่สุดคือ TCT ที่ GMPP 188.71 W PR 75.48% PL 61.29 W และรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ที่แย่ที่สุดคือ SP ที่ GMPP 181.42 W PR 72.57% PL 68.58 W ทั้งนี้ การเชื่อมโยงแบบ SP ส่งผลกระทบจากการบังเงาแบบ SN ซึ่งมีการบังเงาจำนวน 3 แถว 2 หลักในตำแหน่งมุมบนด้านซ้ายของอาร์เรย์ ได้มากกว่าการเชื่อมโยงแบบ TCT เนื่องจากการเชื่อมโยงแบบ SP ไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างคอลัมน์ของอาร์เรย์ ส่งผลให้ 2 คอลัมน์ดังกล่าวมีกำลังผลิตลดลง และ

(2) การจัดเรียงแบบ IC การบังเงาแบบ LW รูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ที่ดีที่สุดคือ SP ที่ GMPP 106.19 W PR 42.48% PL 143.81 W และรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์ที่แย่ที่สุดคือ TCT ที่ GMPP 101.81 W PR 40.72% PL 148.19 W ทั้งนี้ การเชื่อมโยงแบบ TCT ส่งผลกระทบจากการบังเงาแบบ LW ซึ่งมีการบังเงาเกือบเต็มพื้นที่ของอาร์เรย์โดยเหลือจำนวน 3 แถว 3 หลักในตำแหน่งมุมล่างด้านขวาของอาร์เรย์ ได้มากกว่าการเชื่อมโยงแบบ SP เนื่องจากการเชื่อมโยงแบบ SP ไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างคอลัมน์ของอาร์เรย์ส่งผลให้ 3 คอลัมน์ที่ไม่มีการบังเงามีกำลังผลิตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเชื่อมโยงแบบ TCT จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนนั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบการบังเงา การจัดเรียงอาร์เรย์ และรูปแบบการเชื่อมโยงอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับ De Souza Lima, Moreira, Laurindo Maitelli and Barros (2019) และ Bonthagorla and Mikkili (2020)

สรุปผลการวิจัย

การเปรียบเทียบสมรรถนะของการเชื่อมโยงอาร์เรย์ 4 รูปแบบ จากการจัดเรียงอาร์เรย์โมดูล 6 กรณี และการบังเงาบางส่วน 5 กรณี รวม 30 กรณี ดังตาราง 2 พบว่า (1) มี 8 กรณีที่ให้ GMPP เท่ากันทั้ง 4 รูปแบบการเชื่อมโยง โดย 6 จาก 8 กรณีนี้นี้เป็นกรณีที่ไม่มีเงาของทั้ง 6 รูป

แบบการจัดเรียง และอีก 2 กรณีเป็นการจัดเรียงแบบ IC ที่รูปแบบการบังเงาแบบ SW และ LN (2) การเชื่อมโยงแบบ TCT ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ถึง 21 กรณี และ (3) มีเพียงกรณีเดียวที่การเชื่อมโยงแบบ SP ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ในขณะที่การเชื่อมโยงแบบ BL และ HC ไม่ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นในกรณีที่ศึกษาเปรียบเทียบ

การจัดเรียงอาร์เรย์โมดูลโดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ ทั้ง 5 รูปแบบ (MS1-MS5) ร่วมกับการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นในทุกรูปแบบการบังเงาบางส่วน (SW SN LW LN) คิดเป็นร้อยละ 100 ของ 4 กรณีรูปแบบการบังเงาที่จำลองหา GMPP ในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอาร์เรย์ และการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ IC ร่วมกับการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ให้ค่า GMPP สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นในรูปแบบการบังเงาบางส่วนแบบ SN เพียงกรณีเดียวเท่านั้น คิดเป็นร้อยละ 25 ของ 4 กรณีรูปแบบการบังเงาที่จำลองหา GMPP

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ IC MS1-MS5 การเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ทั้ง 5 รูปแบบ พบว่า GMPP ที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับการทดสอบจริงของ Namhormchan (2021) และการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ MS เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ช่วยลดกำลังสูญเสียของอาร์เรย์เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดเรียงแบบ IC สอดคล้องกับ De Souza Lima, Moreira, Laurindo Maitelli and Barros (2019) และการเปรียบเทียบสมรรถนะของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จากการเชื่อมโยงอาร์เรย์ในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงโมดูลที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนในภาพรวมพบว่า การเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียหรือเพิ่มกำลังผลิตได้มากกว่าการเชื่อมโยงอาร์เรย์ในรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับ Bonthagorla and Mikkili (2020) และ Raju and Chengaiah (2019) ทั้งนี้ สามารถแสดงร้อยละของ GMPP ที่ลดลงจากการเชื่อมโยงอาร์เรย์รูปแบบต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ TCT ได้ดังตาราง 3 จากผลการศึกษานี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเชื่อมโยงของอาร์เรย์ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ตาราง 3

ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดจากการเชื่อมโยงอาร์เรย์ในรูปแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ TCT

Shading	Topology	SP*	BL**	HC***	Topology	SP*	BL**	HC***
	Configuration				Configuration			
SW	IC	0.00	0.00	0.00	MS3	22.09	41.08	48.57
SN		4.02	3.33	1.91		12.00	21.57	9.23
LW		-4.13	-0.88	-1.47		45.83	28.35	29.10
LN		0.00	0.00	0.00		22.09	36.18	36.80
SW	MS1	22.09	41.08	43.36	MS4	22.09	55.59	52.15
SN		12.00	16.24	24.06		12.00	26.96	21.29
LW		45.83	21.72	26.34		45.83	29.47	27.14
LN		22.09	36.18	36.80		22.09	36.18	36.80

ตาราง 3 (ต่อ)

Shading	Topology	SP*	BL**	HC***	Topology	SP*	BL**	HC***
	Configuration				Configuration			
SW	MS2	22.09	45.23	46.69	MS5	22.09	55.59	41.03
SN		12.00	19.26	18.19		12.00	18.56	19.29
LW		45.83	27.09	32.02		45.83	27.62	28.34
LN		22.09	36.18	36.80		22.09	36.18	36.80

Note: $SP^* = \frac{TCT-SP}{SP} \times 100$ $BL^{**} = \frac{TCT-BL}{BL} \times 100$ $HC^{***} = \frac{TCT-HC}{HC} \times 100$



References

- Abdelrahman M. M., Abou-Hashima M., El-Sayed, Yehia S. M., & Husam A. R. (2021). Enhancement of photovoltaic system Performance based on different array topologies under partial shading conditions. *Journal of Advanced Engineering Trends (JAET)*, 40(1), 49-61. doi:10.21608/JAET.2021.82192
- Bonthagorla, P. K., & Mikkili, S. (2020). Performance analysis of PV Array configurations (SP, BL, HC and TT) to enhance maximum power under non-uniform shading conditions. *Engineering Reports*, 2(2), e12214. <https://doi.org/10.1002/eng2.12214>
- Charoenpanitseri, W. (2013). How to build a Magic Square. *Srinakharinwirot Science Journal*, 29(2), 207-224. (in Thai)
- De Souza Lima, A., Moreira, A. V. S., Laurindo Maitelli, A., & Barros, L. S. (2019). Maximum power point tracking through Magic Square for Photovoltaic Modules under partial shading. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)* (pp. 1-6). Gramado, Brazil: IEEE. doi:10.1109/isgt-la.2019.8895275
- Namhormchan, T. (2021). Comparative study of enhanced power generation Photovoltaic Array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), 247-261. (in Thai)
- Rakesh, N., Madhavaram, T. V., Ajith, K., Naik, G. R., & Reddy, P. N. (2015). A new technique to enhance output power from solar PV Array under different partial shaded conditions. *2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)* (pp. 345-348). Singapore: IEEE. doi:10.1109/edssc.2015.7285121

- Raju, V. B., & Chengaiah, Ch. (2019). Performance analysis of conventional, hybrid and optimal PV Array configurations of partially shaded modules. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(1), 3061-3073.
- Rani, B. I., Ilango, G. S., & Nagamani, C. (2013). Enhanced power generation from PV Array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku Configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 594–601. doi:10.1109/tste.2012.2230033
- Tubniyom, C., Jaideaw, W., Chatthaworn, R., Suksri, A., & Wongwuttanasatian, T. (2018). Effect of partial shading patterns and degrees of shading on Total Cross-Tied (TCT) Photovoltaic Array configuration. *Energy Procedia*, 153, 35–41. doi:10.1016/j.egypro.2018.10.028
- Yadav, K., Kumar, B., & D., S. (2020). Mitigation of mismatch power losses of PV Array under partial shading condition using novel Odd Even configuration. *Energy Reports*, 6, 427–437. doi:10.1016/j.egy.2020.01.012

